ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТИМИРЯЗЕВСКИЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ

Проф. В. ЛЕМАН

ЭНЕРГИЯ
и
ЭНТРОПИЯ

СЕВЕРНЫЙ ПЕЧАТНИК
ВОЛОГДА 1926

СЕВЕРНЫЙ ПЕЧАТНИК

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТИМИРЯЗЕВСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
изучения и пропаганды естественно-научных основ диалектического материализма

СЕРИЯ IX
„НА ПУТИ К МАТЕРИАЛИЗМУ“
(Пособия для учителя и самообразования)
ВЫПУСК № 16

Инж. В. ЛЕМАН

Энергия и энтропия

„СЕВЕРНЫЙ ПЕЧАТНИК“
Вологда, 1926

Инж. В. ЛЕМАН

ЭНЕРГИЯ И ЭНТРОПИЯ

ОБЩЕДОСТУПНОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ ИХ СУЩНОСТИ И ОСНОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ

Перевод З. и Ф. Крашенинниковых

„СЕВЕРНЫЙ ПЕЧАТНИК“
ВОЛОГДА
1926

Типо-литография Акц. Об-ва «Северный Печатник».

Гублит № 998. (Вологда). Тираж 3000.

ПРЕДИСЛОВИЕ ПЕРЕВОДЧИКА.

На русском языке есть хорошие общедоступные изложения учения об энергии и ее превращениях, понятия об энтропии: напр., проф. Иенского Университета Ауэрбаха: «Царица мира и ее тень», перевод в издании «Матезис», и др. Настоящая брошюра инженера Лемана несколько отличается от обычных популярных книжек. Это не простая популярная лекция. Изложенная ясным языком, легко доступная для широких масс учащейся молодежи, она будет особенно полезна, если ее не только прочесть, но и проработать с карандашом в руках, повторить все положения, приведенные в сжатой, конспективной форме. Отвечая современным требованиям, она содержит целый ряд практических указаний и разъяснений и вводит читателя в сущность расчетов при различных технических установках, пользующихся энергией в той или иной форме.

Брошюра эта может быть очень полезной для слушателей Рабочего факультета.

I. Энергия.

Что такое энергия? Есть ли это свойство человека, которое мы называем творческой силой? В дальнейшем мы будем рассматривать не ее, а то, что **физики** называют энергией. Она присуща в той или иной мере также и всякому неживому телу; мы можем наблюдать ее ежедневно и ежечасно во всем, совершающемся вокруг нас. Поэтому проявление энергии стало для нас настолько обычным, что она привлекает наше внимание лишь тогда, когда в этих проявлениях участвуют большие количества энергии. Мы с удивлением следим, с какой легкостью современный гигантский кран поднимает грузы, во много тонн весом, на головокружительную высоту: здесь нужна энергия! Шумно низвергающиеся водные массы Ниагары свидетельствуют о мощной энергии потока. Во время грозы энергия молнии расщепляет могучие деревья, энергия ветра вырывает их с корнем. Но та же энергия ветра совершает мирную работу, вращая наши ветряные мельницы. Когда горячая струя воздуха от всепожирающего пожара ударяет нам в лицо, это— тоже энергия; мы ощущаем ее и тогда, когда

солнце посылает нам свои теплые лучи, без которых невозможны ни рост, ни преуспеяние. Энергия покоится и в почве, в наших драгоценных залежах каменного угля. Когда она воскресает, человек перемещает ее по тонким проводам в отдаленные местности для плодотворной работы, в виде электрической энергии.

Формы энергии.

МЕХАНИЧЕСКАЯ РАБОТА.

Если мы поднимаем тело, в G килограммов весом, на высоту h метров, мы исполняем механическую работу A, величина которой определяется произведением веса на высоту, то-есть:

$$A = G \, . \, h \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

Например, чтобы поднять 20 кгр. на 2 метра, нужно произвести работу в $20 . 2 = 40$ килограммометров. Совершенно такая же работа потребовалась бы для поднятия 40 кгр. на 1 метр, или 10 кгр. на 4 метра. Но путь, проходимый при работе, далеко не всегда имеет вертикальное направление. Если для перестановки тяжелого стола требуется давление в 5 кгр., то для передвижения его на 2 метра в горизонтальном направлении нужна механическая работа в $5 . 2 = 10$ кгр. Но, если давление на стол не вызывает движения, никакой работы не производится, потому что для работы нужна не только сила, но и движение. Количество

работы нисколько не меняется в зависимости от того, производится ли поднятие груза или перестановка стола быстро, или очень медленно, потому что под механической работой мы подразумеваем произведение силы на пройденный путь.

ЭНЕРГИЯ ДВИЖЕНИЯ.

Груз, поднятый на высоту, обладает работоспособностью, которую мы можем использовать разными путями. Например, мы можем при помощи этого груза целыми днями поддерживать ход часов; мы можем также предоставить телу свободно упасть: тогда работоспособность $G \,.\, h.$, которую мы сообщили телу при поднятии, послужит для достижения скорости. Согласно законам падения тел, тело, падающее с высоты h, на которую оно первоначально было поднято, при достижении им исходной точки приобретает скорость v, которую можно вычислить из следующего выражения:

$$v = \sqrt{2. \ g \,.\, h},$$

где g есть ускорение $= 9{,}81$ м. Отсюда следует, что высота поднятия:

$$h = \frac{v^2}{2 \,.\, g}$$

Если мы подставим эту величину в равенство, определяющее работу (1), то получим:

$$A = G \cdot h = G \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} = \frac{G \cdot v^2}{g \cdot 2}.$$

Выражение $G : g$ есть величина постоянная для каждого тела, и, как известно, она называется его массой m. При подстановке этого выражения в вышеприведенное равенство, обозначающее работу, оно примет такой вид:

$$A = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (2)$$

Равенства 1 и 2 изображают величину A двумя различными способами; равенство 1 означает механическую работу, как произведение силы на пройденный путь, а равенство 2 есть выражение, которое тем больше, чем больше масса тела и чем больше квадрат скорости. Оба выражения, $G \cdot h$ и $m \cdot v^2 : 2$, представляют собою не что иное, как различные способы изображения того, что мы называем энергией. Во время падения тела с высоты h, механическая работа $G \cdot h$ целиком превратилась в энергию движения $m \cdot v^2 : 2$. Итак, всякому движущемуся телу присуща такая энергия, которая может достигать огромной величины, особенно при быстром движении; например, как известно, энергия движения гранаты настолько велика, что она пробивает толстую металлическую броню. Энергия движения тела легко превращается обратно в форму энергии, свойственную механической работе. Например,

железнодорожный вагон, катящийся по горизонтальному пути, не останавливается, когда начинается подъем, но вкатывается вверх по подъему на некоторое расстояние, пока не будет израсходована его энергия движения, служащая для вкатывания вагона на подъем.

ЭНЕРГИЯ НАПРЯЖЕНИЯ.

Если мы хотим натянуть пружину, мы должны произвести механическую работу, совершенно так же, как и для поднятия груза. Но из опыта мы знаем, что сила, вызывающая скручивание или выпрямление пружины, не постоянна: она тем больше, чем сильнее изгиб пружины. Если сила P вызывает изгиб в h сантиметров, то сила вдвое меньшая вызовет вдвое меньший изгиб, а в начале сила, требующаяся для изгиба, вообще равна нулю. Поэтому, пока пружина проходит путь изгиба h, сила должна возрасти от нуля до P. Следовательно, в среднем она равна $P:2$. Поэтому работа, затраченная для натяжения пружины, равна средней силе, умноженной на изгиб, то-есть

$$A = \frac{P}{2} \cdot h \qquad (3)$$

Эту **энергию напряжения** пружины можно также превратить в иные формы энергии. При помощи натянутой пружины мы можем поднять груз, мы можем также посредством

нее привести тело в движение, то-есть получить энергию движения. Когда железнодорожный вагон ударяется об упор, происходит двойное превращение энергии. В первую половину времени удара энергия движения вагона превращается в энергию натяжения пружин буферов, а во вторую половину сдавленные пружины выпрямляются обратно и возвращают обратным толчком свою энергию вагону в виде энергии движения. Такую же двойную передачу мы можем наблюдать при ударе любого эластического тела.

ТЕПЛОВАЯ ЭНЕРГИЯ.

Рассмотрим еще раз поднятие груза G. Для поднятия его на h метров мы должны затратить механическую работу $A = G \,.\, h$. Поднятый груз обладает совершенно такой же работоспособностью, которая при падении груза целиком превращается в энергию движения. Как только тело опустилось до своего прежнего положения, его энергия движения есть $m \,.\, v^2 : 2$, равная $G \,.\, h$. Какова же судьба этой энергии, когда тело внизу достигнет дна? Так как после того оно находится в покое, оно уже не обладает энергией движения. А так как оно уже не поднято, оно не обладает и работоспособностью. Однако, энергия, ранее ему присущая, не исчезла: она превратилась в тепловую энергию, которая несколько повышает тем-

пературу тела и температуру места, о которое оно ударилось, сравнительно с температурой окружающей среды. Мы можем сделать этот опыт еще нагляднее, если будем спускать груз по шнуру, держа груз в руке. Тогда мы будем ощущать тепло, в которое переходит затраченная ранее механическая работа. Следовательно, теплота есть не что иное, как особая форма энергии.

МЕХАНИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ТЕПЛОТЫ.

Этот факт дал толчок к исследованию вопроса, чем вообще теплое тело отличается от холодного; оказывается, что в твердых телах мельчайшие частицы, молекулы, не находятся в покое, но совершают непрерывные, быстрые колебательные движения, и что скорость этого движения в теплом теле больше, чем в холодном. Ясно, что тепловая энергия тела не представляет собою чего-либо нового: это только с у м м а э н е р г и и д в и ж е н и я в с е х м о л е к у л. Существенное отличие этой тепловой энергии от энергии движущегося тела, рассмотренной нами раньше, состоит в том, что движение молекул происходит б е с п о р я д о ч н о и н е п р а в и л ь н о, тогда как все частицы тела, которое движется, как целое, совершают параллельные пути.

Тогда как в твердых телах молекулы могут совершать только колебательные движения, в

газах, у которых между молекулами нет тесной связи, молекулы движутся по прямолинейным, но случайным путям. Конечно, при громадном числе молекул газа, отдельная молекула не может долго идти по своему прямому пути, потому что она натолкнется или на другие молекулы, или на стенки сосуда. При таких столкновениях направление движения по большей части изменяется, а также, в зависимости от направления толчка, скорость движения молекул увеличивается или уменьшается. Итак, сосуд, наполненный газом, содержит в себе неисчислимый рой беспорядочно носящихся молекул, быстрота движения которых зависит также и от температуры. Чем она выше, тем подвижнее молекулы. Когда мы ощущаем пальцами повышение температуры в каком-нибудь теле, она представляет собою только более сильные удары ускоренно движущихся молекул о концы нервов в наших пальцах. А так как удары молекул тем сильнее, чем больше энергия их движения $m. v^2 : 2$, мы в некотором смысле ощущаем величину энергии этого движения. При остывании тела, конечно, движение молекул замедляется, и возникает вопрос: при какой температуре движение молекул прекращается? Законы, установленные для газов, учат нас, что это должно произойти при —273° Ц., то-есть при очень низкой температуре, которая еще не была получена и, может быть,

не будет получена никогда. При этом абсолютном нуле всякая жизнь угасает, молекулы пребывают в совершенном покое. Если мы исчисляем температуру тела от абсолютного нуля, мы называем его абсолютной температурой, которая, следовательно, всегда на 273° превышает обычную.

Быстрота движения, свойственная молекулам газа, конечно, изменяется, вследствие их постоянных столкновений. Но так как лишь немногие молекулы движутся очень медленно, или с исключительно большой скоростью, преобладающее количество их летит со среднею скоростью, которая приближается к средней быстроте движения всех молекул. Эта средняя скорость составляет для водорода, при температуре таяния льда, 1844 м. в секунду, а для кислорода 461 м. в секунду. Легко понять, что очень легкие молекулы водорода должны двигаться быстрее, чем более тяжелые молекулы кислорода, при той же температуре. Если мы, погружая руку в тот и другой газ, ощущаем одинаковую температуру, это значит, что молекулы водорода ударяются о наши нервы с такою же силою, как и молекулы кислорода. Но если легкая молекула производит столь же сильный удар, как и более тяжелая, она должна лететь соответственно быстрее. При большой быстроте движения молекул, столкновения их происходят тем чаще, чем больше молекул на-

ходится в данном пространстве, то-есть чем сильнее газ сжат. Уже при обычном атмосферном давлении молекула не может пройти одной тысячной доли миллиметра без столкновения с другими. Поэтому число столкновений, которым подвергается молекула в секунду, исчисляется миллионами.

ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ГАЗОВ.

Как известно из опыта, газ, находящийся в замкнутом пространстве, оказывает давление на стенки. Это давление есть не что иное, как непрерывные толчки бесчисленных молекул газа. Ясно, что давление газа будет тем больше, чем выше его абсолютная температура, потому что более высокой температуре соответствует бо́льшая скорость движения молекул. Чтобы сдавить, сжать газ, заключенный в цилиндре с подвижным поршнем, как изображено на рис. 1, нужно затратить механическую работу; наоборот, газ, расширяясь, может произвести механическую работу, как натянутая пружина: При таком сжатии и расширении газа следует различать два случая: 1. Стенки цилиндра вполне теплопроводны, так что всякое изменение

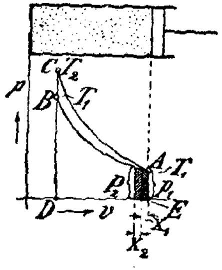


Рис. 1.

температуры внутри цилиндра тотчас же уравновещивается вполне постоянной внешней температурой. Ясно, что тогда температура заключенного газа, при всяком мыслимом состоянии его, останется постоянной. Такое изменение состояния называется *изотермическим*. 2. *Стенки цилиндра* вполне *нетеплопроводны*. В таком случае изменение, происходящее в состоянии газа, называется *адиабатическим*.

ИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ ИЗМЕНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ.

Сначала мы рассмотрим изотермическое сжатие при теплопроводном цилиндре. Температура заключенного в нем газа остается неизменной, когда мы вдвигаем поршень, а, следовательно, скорость движения молекул и сила их ударов тоже не меняются. Но как только мы вдвинем поршень настолько, что газ займет половину первоначального объема, молекулы будут расположены вдвое плотнее, и за один и тот же период времени на поршень будет приходиться вдвое большее число ударов молекул. Поэтому давление на поршень, вначале равное p_1, увеличится вдвое. Совершенно так же уменьшение объема до одной четверти вызовет усиление давления в четыре раза. Если мы обозначим давление при различном положении поршня вертикальными линиями, мы получим кри-

вую AB рисунка 1-го, так называемую изотерму. Механическая работа, которую мы должны затратить, чтобы вдвинуть поршень от E до D, может быть представлена площадью $ABDE$, потому что для незначительного перемещения поршня x_1 нужна работа $p_1 . x_1$, а для дальнейшего передвижения x_2 должна быть затрачена работа $p_2 . x_2$. Эта работа изображена в виде заштрихованных прямоугольников, которые в совокупности составят площадь $ABDE$. Какова же судьба этой доставленной нами энергии? Пока поршень неподвижен, ударяющиеся о него газовые молекулы отбрасываются с такою же скоростью, с какой ударяются. Но когда мы вдвигаем поршень, скорость отталкивания молекул превышает первоначальную на скорость движения поршня. Итак, вследствие движения поршня движение молекул ускоряется, т.-е. температура повышается. Но, по нашему допущению, температура, вследствие теплопроводности цилиндра, не может повыситься, так что вся доставленная нами механическая работа, соответствующая площади $ABDE$, превращаясь в тепло, выходит через стенки цилиндра в окружающую среду. Если мы затем предоставим сжатому газу вновь расшириться, скорость движения поршня должна быть вычтена из скорости движения молекул, так что скорость движения молекул уменьшается, но это не влечет за собою общего пониже-

ния температуры газа, потому что извне в цилиндр притекает тепло. Работа, производимая газом, равна той, которая была затрачена на его сжатие, следовательно, она будет изображена *BAED*.

АДИАБАТИЧЕСКОЕ ИЗМЕНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ.

При адиабатическом сжатии, в непроводящем тепла цилиндре, при движении поршня движение молекул, конечно, ускоряется. Но выход развивающейся теплоты наружу невозможен, так что температура газа должна повышаться. Ясно, что вследствие более высокой температуры давление при адиабатическом сжатии должно быть выше, чем при изотермическом сжатии. На рис. 1 адиабата представлена площадью *ACDE*. В противоположность тому, что происходит при изотермическом сжатии, эта работа не может ускользать из цилиндра в виде теплоты, но идет на нагревание газа, температура которого, первоначально равная T_1, возрастает до T_2. При адиабатическом расширении сжатого газа, производимая им работа *CAED* заимствуется из запасной теплоты газа, который соответственно охлаждается с T_2 до T_1.

Если мы представим себе, что на рукоятку поршня действует сила, которая во всякое мгновение равна и противоположна давлению

газа, тогда мы будем иметь равновесие при любом положении поршня. Если не принимать во внимание потерь, то и изотермическое, и адиабатическое изменения состояния обратимы, и мы можем построить кривую давления по желанию: сверху вниз—для расширения, или снизу вверх—для сжатия.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ.

Рассмотрим еще раз упомянутый нами ранее поднятый груз. Чтобы поднять его на высоту h метров, мы должны затратить механическую работу $G.h$. Не будем превращать эту работу в энергию движения, предоставляя телу падать, но предположим, что тяжелый груз наложен на одну из верхних лопастей водяного колеса и затем медленно опускается, повертывая колесо. Как только груз переместится вниз, его работоспособность окажется утраченной; если водяное колесо соединено с мельницей, мы могли посредством этого груза некоторое время поддерживать движение мельницы. Но к водяному колесу можно также присоединить динамомашину. Тогда механическая работа опускающегося груза $G.h$ передастся электрической машине и превратится в ней в электрическую энергию. Итак, мы видим, что электричество есть не что иное, как форма энергии. Если мы проведем электрическую энергию, выработанную в динамомашине,

по проводам к электродвигателю, электрическая энергия превратится в нем опять в механическую работу. Мы можем также провести выработанный ток через электрическую печь и тогда получим в нем первоначально затраченную работу обратно, в виде теплоты.

ЛУЧИСТАЯ ЭНЕРГИЯ.

В электрических лампочках накаливания бо̀льшая часть поступающей электрической энергии превращается в теплоту, однако не вполне. Очень небольшая доля энергии излучается в окружающее пространство, вследствие высокой температуры, в виде лучистой энергии. Лучи этой энергии, исходящие из тела в количестве тем большем, чем сильнее оно нагрето, распространяются, как известно, и в совершенно пустом пространстве; установлено, что они представляют собою колебательное движение мельчайших волн. Действие лучистой энергии в высокой степени зависит от длины волны колеблющегося луча. Лучи с наименьшей длиной волны известны под названием рёнтгеновских лучей; хотя они невидимы для нашего глаза, они легко проникают сквозь все тела, имеющие низкий удельный вес. Лучистая энергия, при длине волны от 0,0004 мм. до 0,0008 мм., представляет собою световые лучи, причем фиолетовые лучи имеют короткую волну, а красные—длинную. Белый

свет солнца есть смесь всех цветных лучей, которыми мы любуемся в радуге; таким образом, эта смесь состоит из световых лучей различной длины волны. Лучистая энергия, при длине волны, превышающей 0,0008 мм., уже не действует на зрение, но оказывает влияние на кожу, потому что, попадая на кожу, эта лучистая энергия переходит в теплоту. Наконец, лучистая энергия, при длине волны более 3 мм., называется электрическими лучами. Но эти лучи, при достаточно большой длине волн, распространяются уже не прямолинейно, как, например, те волны, которые употребляются для беспроволочного телеграфа: они бывают длиною в несколько сотен и даже в несколько тысяч метров.

ХИМИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ.

Лучистая энергия имеет для нас и для нашей земли величайшее значение, потому что почти вся энергия, получаемая землею, доставляется ей в виде лучистой энергии солнцем. Жизнь людей и рост растений должны были бы остановиться, если бы иссякли лучи солнца, доставляющие энергию. Ибо лучистая энергия солнца создает в зеленом листе растения из углекислоты воздуха новый горючий материал, или крахмал и сахар. Горючий материал, сгорая в наших печах, возвращает нам солнечную энергию в виде тепла. Таким обра-

зом, топливо заключает в себе лучистую энергию солнца в новой, связанной форме, которую мы называем химической энергией. Совершенно так же химическая энергия крахмала, который образуется особенно обильно в клубнях картофеля и в зернах злаков, после принятия пищи превращается в теплоту в теле человека и животного, но, в отличие от сгорания в топке, часть энергии может быть превращена в мышцах в механическую энергию. Так как наши залежи каменного угля представляют собою горючий материал засыпанных и обуглившихся первобытных лесов, и так как энергия, которую мы заимствуем у наших водопадов, также происходит от лучистой энергии солнца, мы должны признать его за единственный источник энергии для нашей земли.

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ.

Итак, мы знаем, что энергия существует в различных формах, и что одна форма может превращаться в другую. На основании опыта мы выводим важный закон, именно закон сохранения энергии, который учит нас, что количество энергии, при всяком превращении ее, остается неизменным. Энергия никогда не может исчезнуть или утратиться, и точно так же энергия никогда не может вновь возникнуть. Энергия низвергающихся водных масс Ниагары, хотя ее и не восприни-

мает никакая турбина, не исчезает, потому что водные массы, оттекающие внизу, немного теплее тех, которые притекают вверху. Также и та тепловая энергия, которую мы извлекаем из химической энергии угля в наших печах, не исчезает. Сначала она повышает температуру нашей комнаты, а затем постепенно распространяется по всей земле, настолько сглаживаясь, что мы уже не можем ощущать ее. Мощная энергия, необходимая для работы заводов, для движения станков и для изготовления предметов потребления, в большей своей части переходит в теплоту, при чем хотя и ускользает от нас, однако не утрачивается.

При превращении одной формы энергии в другую, количество энергии не меняется. Поэтому определенная механическая работа дает всегда одинаковую энергию движения, не больше и не меньше. Груз, для поднятия которого потребовалось *A* килограммометров, может при своем падении достигнуть энергии движения только в *A* килограммометров, а при ударе его о дно развивается теплота, количество которой в точности соответствует величине энергии движения. Но, так как тепловую энергию, к сожалению, измеряют иначе, а именно в тепловых единицах (*WE*) или килокалориях, для исчисления количества теплоты необходим переводный множитель. Найдено, что

426 кгм. = 1 калории . . . . (4),

причем под 1 кал., как известно, подразумевают количество теплоты, нужное для нагревания 1-го кгм. воды на 1°. Следовательно, груз в 426 кгм., при падении с высоты одного метра, даст при ударе столько теплоты, что один литр воды нагреется на 1°. Электрическая энергия измеряется иначе, именно

1 килоуаттчас = 860 кал. . . . (5),

1 кгм. = 9,81 уаттсекунд . . . (6).

Лучистая и химическая энергии измеряются тепловыми единицами. При полном сгорании один килограмм чистого углерода дает 8100 кал., а один килограмм водорода—34000 кал.

PFRPETUUM MOBILE.

Из закона сохранения энергий вытекает, что из машины никогда нельзя извлечь больше энергии, чем ей доставлено. Динамомашина, которая потребляет за известный срок 1 кгм. механической работы, может дать за тот же срок не более 9,81 уаттсекунд электрической энергии. Совершенно немыслима такая машина, которая вырабатывала бы энергию, не потребляя ее, т.-е. создавала бы энергию из ничего. Такую машину, под названием perpetuum mobile, долгое время тщетно старались изобрести.

ПОЛЕЗНОЕ ДЕЙСТВИЕ.

Действительно существующие машины не только не дают новой энергии, но даже превра-

щение энергии никогда не происходит вполне так, как мы желаем. Например, электродвигатель никогда не превращает поступающую в него электрическую энергию целиком в механическую работу: незначительная часть энергии без пользы переходит в теплоту. Эту теплоту, развивающуюся помимо нашего намерения, обыкновенно называют потерей машины, при чем следует заметить, что эта энергия отнюдь не исчезает: она распространяется в окружающем пространстве и утрачивается лишь для наших целей. Если мы назовем энергию, доставляемую машине, A_1, а ту энергию, которую машина отдает в иной форме, A_2, A_1 будет всегда больше, чем A_2; $A_1 - A_2$ уходит в пространство в виде теплоты, без пользы для нас. Отношение количества энергии, отдаваемой машиной, к количеству энергии, поступающей в нее, называется полезным действием машины η, то-есть

$$\eta = \frac{A_1}{A_2} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (7)$$

НАКОПЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ.

Так как энергия, в каком-нибудь определенном пространстве, всегда остается неизменной в своей совокупности, хотя может превращаться и перемещаться, мы должны заключить, что существуют места, в которых она пребывает в то время, когда не происходит ни пре-

вращения, ни перемещения ее; в таких местах энергия накопляется. Самый распространенный способ накопления энергии состоит в том, что поднятый груз удерживают в таком состоянии; а когда является надобность в энергии, ему предоставляют падать вполне или отчасти. Мы располагаем огромными хранилищами энергии, например, в виде больших плотин в долинах; избыток работоспособности водных масс в запруженных долинах, накопляющийся за холодное время года, при надобности получает применение летом.

Незначительные количества энергии чаще всего запасают в виде натянутых пружин, потому что пружины, благодаря своей слабой инерции, быстрее отдают энергию, чем поднятые грузы. Энергия движения также поддается накоплению. Как часто бывает в технических применениях, в этом случае нет надобности, чтобы движущееся тело пробегало прямолинейный путь, потому что мы должны довольствоваться тесным пространством. Поэтому мы вынуждены как бы намотать пробег тела в клубок, т.-е. направить движущееся тело по круговому пути. Такими складами энергии служат маховые колеса наших машин, в которых иногда держится наготове весьма значительное количество энергии. Например, маховики тяжелых прокатных станков иногда содержат более 10 миллионов кгм. энергии движения: этой

энергии было бы достаточно, чтобы поднять огромный груз маховика на высоту нескольких сот метров. Накопление энергии движения имеет предел: он определяется прочностью вращающегося тела. При слишком большой быстроте вращения тело разрушилось бы от центробежной силы. Кроме того, накопленная энергия движения не может сохраняться неопределенно долгое время, потому что на практике невозможно вполне избегнуть трения вращающейся массы. По этой причине небольшая доля энергии движения всегда превращается без пользы в теплоту.

Электрическая энергия, вообще наиболее податливая, может быть накоплена лишь в весьма ограниченной мере. Правда, вокруг проводника, по которому идет ток, образуется магнитное поле, содержащее энергию; но этот запас энергии скорее неудобен, потому что при размыкании цепи эта энергия неизбежно ускользает и превращается в теплоту, давая искры на концах проводов. Та электрическая энергия, которая накопляется в электрическом поле между разноименными проводами, не может быть значительной даже в том случае, если мы очень тесно сблизим полюсы и устроим их в виде больших поверхностей, как в электрических конденсаторах (лейденские банки). Электрическая энергия имеет ту особенность, что она сосредоточивается не в самом провод-

нике, но в непроводящем пространстве, окружающем проводник.

Можно было бы возразить: ведь электрическая энергия накопляется в аккумуляторах! Однако, это неправильно, потому что при заряде аккумулятора поступающая электрическая энергия идет на химическое изменение свинцовых пластинок. Следовательно, электрическая энергия превращается в химическую и сохраняется, как таковая. При разряде аккумулятора происходит обратное: химическая энергия переходит в электрическую.

Химическая энергия отличается от всех прочих форм энергии тем, что ее легче всего сохранять. Мы в настоящее время расходуем те запасы химической энергии, которые тысячелетиями покоились под землею в виде каменноугольных пластов. Достаточно химической энергии одного бидона бензина, чтобы грузовой автомобиль прошел многие километры. Правда, в технике мы прибегаем также к сохранению тепловой энергии, но такое накопление страдает недостатком: с течением времени некоторая доля энергии ускользает, потому что мы, к сожалению, не знаем вполне совершенного теплового изолятора.

ПОТЕРЯ ЭНЕРГИИ.

Рассмотрим некоторые процессы по отношению к превращению энергии. Для использования запасов энергии наших угольных богатств

мы обыкновенно превращаем их химическую энергию в теплоту при высокой температуре, в топке парового котла. Затем, пользуясь паром, как носителем энергии, мы передаем эту теплоту в паровые турбины, где тепловая энергия превращается в механическую работу. Ясно, что пар, выходящий из турбины, бывает значительно холоднее, чем при поступлении в нее, причем охлаждение соответствует количеству тепла, превращенному в работу. Механическая работа, развиваемая турбиной, передается через вал динамомашине и превращается в ней в электрическую энергию. Но, при установке на практике, от этой струи энергии, протекающей через машины, к сожалению и против нашей воли, отходят боковые ветви. Уже в топке котла некоторая доля тепловой энергии передается окружающей среде вследствие теплопроводности и излучения и, таким образом, утрачивается для наших целей.

Такая же потеря происходит при передаче горячего пара, и, наконец, как в турбине, так и в динамомашине превращение тока энергии происходит не целиком: часть его и здесь переходит в тепло и служит только для того, чтобы повысить в ничтожной мере температуру земли.

Какова же дальнейшая судьба того количества энергии, все еще значительного, которое доставляют наши электрические станции?

Поскольку она служит для освещения, она без остатка переходит в теплоту; когда она, превращаясь в электродвигателях в механическую работу, приводит в движение станки, мельницы и проч., ее конечной стадией бывает опять-таки теплота, при низкой температуре окружающего пространства; наконец, когда мы употребляем энергию для того, чтобы поднимать кирпичи при постройке дома, эта энергия все-таки перейдет в тепло, хотя и через многие годы, когда этот дом будут ломать.

У каждого человека и у каждого животного в жировом и мышечном веществе тела имеется запас химической энергии, который может расходоваться по мере надобности. Когда мы колем дрова, химическая энергия тела отчасти превращается в теплоту и нагревает тело, отчасти же переходит в механическую работу, для производства энергии движения топора. Но после удара топора также и эта энергия переходит в теплоту и сообщается окружающему пространству. Мы могли бы рассмотреть множество подобных примеров, но конечный результат был бы всегда один и тот же: находящаяся в нашем распоряжении энергия, химическая энергия угольных богатств, лучистая энергия солнца или же работоспособность наших водопадов в конце концов вливаются тепловой струей в обширный тепловой океан нашей земли.

II. Энтропия.

ЦЕННОСТЬ ЭНЕРГИИ.

Мы знаем, что механическая работа в 426 кгм представляет собою такую же энергию, как одна кал., и что один киловатт-час равноценен теплоте 860 кал. Но цены, которые мы платим за энергию разных форм, нимало не соответствуют этим цифрам. По ценам довоенного времени 1000 кал. из электрической энергии стоили бы около 47 пфеннигов, а такое же количество теплоты из угля обошлось бы только 0,2 пф. Но и сама тепловая энергия расценивается различно, в зависимости от высоты температуры. 1 литр воды в 100° представляет для нас больше ценности, чем 10 литров воды 10°. Точно так же теплота, развиваемая центнером угля, нам дороже, чем миллиарды тепловых единиц, содержащихся в океане. Механическая энергия, которая в повседневной жизни редко продается как таковая, расценивается столь же высоко, как электрическая. Напротив, расценка химической энергии только потому не выше расценки тепловой энергии, что в настоящее время мы почти всегда бываем вынуждены предварительно превращать химическую

энергию в тепловую, чтобы использовать ее. Причиной неравномерной расценки для разных форм энергии является уже упомянутое нами стремление всякой энергии по возможности переходить в теплоту, и притом в теплоту наиболее низкой температуры. Мы не знаем такой машины, которая без пользы не превращала бы некоторой доли поступающей в нее энергии в теплоту, и мы не знаем такого движения, при котором не развивалось бы сколько-нибудь теплоты помимо наших намерений; так как мы, несмотря на все усилия и на все расходы, никогда не можем воспрепятствовать, чтобы при всех процессах против нашей воли развивалась теплота, которая тем менее поддается дальнейшему использованию, чем ниже ее температура, мы смотрим на нее как на выродившуюся, малоценную энергию.

Итак, среди разных форм энергии теплота занимает особое, исключительное положение, которое, согласно приведенным соображениям, основано на следующем: хотя теплота, подобно механической энергии, есть энергия движения, однако это движение вполне *беспорядочно* и *хаотично*. Но, помимо стремления энергии переходить в теплоту, нужно отметить еще одно ее свойство. Энергия стремится также распространиться на возможно большее пространство. Например, теплота, накопленная в нагретом теле, сохраняется недолго: уже вскоре тело

охлаждается, т.-е. избыток его теплоты рассеивается по всей окружающей среде. Выражаясь кратко, мы можем сказать: в природе существует стремление превращать в теплоту иные формы энергии и затем распределять эту энергию в пространстве. Следовательно, природа стремится все уравнять, и если бы солнце не доставляло нам постоянно новой энергии, вскоре на земле образовалось бы равномерно теплое море, без различия температуры и без всех иных форм энергии; такое состояние означало бы прекращение всякой жизни и всех вообще процессов.

СТРЕМЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ К НАИБОЛЕЕ ВЕРОЯТНОМУ ПОДВИЖНОМУ СОСТОЯНИЮ.

Мы знаем по опыту, что если две песчинки *A* и *B* (рис. 2 *a*) лежат рядом на расстоянии *a*, то, вероятно, через некоторое время расстояние между ними станет больше, вследствие неизбежных сотрясений или по иным причинам. Но не могут ли песчинки сдвинуться ближе? Без сомнения, могут. И, если мы повторим один и тот же опыт сто раз, мы наверно несколько раз будем наблюдать, что песчинки сблизятся. Но большею частью мы будем видеть обратное, потому что это в е р о я т н е е. Посмотрим, например, на песчинку *B*. При сотрясении она вообще может передвинуться в л ю б о м направлении компаса. При некото-

рой доле возможных передвижений *r*, именно при начерченных на рис. 2 *BC—BD—BE*, песчинки расходятся, тогда как при передвижениях, которые не изображены, *BE—BF—BC*, происходит сближение. Таким образом, возможность расхождения гораздо больше, чем возможность сближения, и поэтому расхождение песчинок вероятнее.

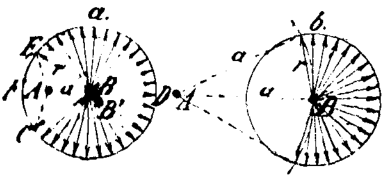


Рис. 2.

На рис. 2 *b* мы, кроме того, видим, что при увеличивающемся расстоянии между песчинками вероятность расхождения уменьшается. Поэтому, если мы представим себе, что рядом с песчинкой *B* находится другая, B^1, которая также подвергается передвижению, то вероятность, что *B* и B^1 передвинутся в одном и том же направлении, крайне мала. Гораздо вероятнее, что оба направления будут какие угодно, т.-е. беспорядочные. Итак, выражаясь кратко, мы можем установить для наших песчинок следующее: если перемещения вообще возможны, то, во-первых, они будут происходить неправильно по всевозможным направле-

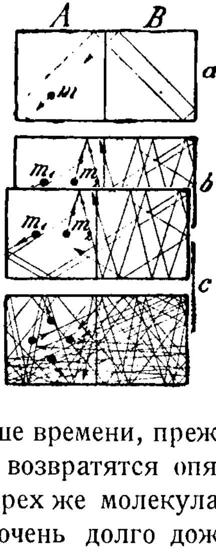
ниям, и, во-вторых, расстояние между песчинками будет увеличиваться. Заметим, что мы будем наблюдать такое двоякое стремление только потому, что оно более вероятно.

Вспомним теперь, что и энергия обладает, как мы видим, таким же двояким стремлением. Она также стремится, во-первых, перейти в неправильную энергию движения, т.-е. в теплоту, и, во-вторых, она стремится распространиться на возможно большее пространство. Поэтому мы можем сказать и про энергию: она стремится к тому состоянию только потому, что оно в е р о я т н е е. В этом стремлении к наиболее вероятному состоянию энергии кроется величайший из известных нам законов природы; закон, который дает направление всему совершающемуся.

Этот вывод сперва приводит нас в некоторое смущение: мы привыкли принимать, что все совершающееся происходит по неизменным, непреклонным законам, и вдруг оказывается, что величайший из всех законов—закон вероятности, т.-е. такой закон, из которого мыслимы исключения.

Для большей ясности мы рассмотрим пример. В пространстве *A* (рис. 3 *a*) заключен газ, который состоит из одной единственной молекулы *m*. В зависимости от температуры, скорость движения этой молекулы вполне определенна, и молекула безостановочно летает

в пространстве *A* взад и вперед, как биллиардный шар. Но, если мы удалим перегородку, которая отделяет пространство *A* от *B*, молекула газа очень скоро попадет в пространство *B* и будет ударяться о все стенки обоих помещений, то-есть молекула будет оказывать давление на них. Но уже после того, как молекула пройдет довольно короткий путь, изображенный на рис. 3*a*, она вступит обратно и первоначальное пространство, и если бы мы могли быстро вдвинуть перегородку, получилось бы исходное положение.



На рис. 3*b* изображен такой же предполагаемый путь для двух молекул газа, m_1 и m_2. Начерченные пути их показывают, что теперь пройдет гораздо больше времени, прежде чем обе молекулы случайно возвратятся опять в пространство *A*. При четырех же молекулах, по рис. 3*c*, нам придется очень долго дожидаться мгновения, когда все четыре одновременно вновь очутятся в пространстве *A*, потому что вероятность такого случая крайне мала. Что же происходит тогда, когда мы действительно наблюдаем некоторый объем газа, с миллиардами молекул? И тогда был бы мыслим

случай, когда все молекулы одновременно влетели бы обратно в пространство *A*, но вероятность такого случая так неимоверно мала, что для осуществления его потребовался бы неимоверно долгий срок. Мы смело можем назвать такой невероятный случай невозможным. В действительности людям никогда не удавалось наблюдать, чтобы газ сам собою собирался на меньшее пространство. Итак, мы видим и здесь, что закономерность, установленная опытом, сводится только к закону вероятности.

ПЕРПЕТУУМ МОБИЛЕ 2-го РОДА.

Предположим, что на рис. 3 все молекулы часто оказываются в пространстве *A*, даже при большом числе молекул. Тогда мы могли бы предоставить газу расшириться и при этом произвели бы механическую работу. Затем мы должны были бы ждать, когда все молекулы вновь возвратятся в первоначальное пространство; потом мы могли бы вновь расширить газ для производства работы, и так далее до бесконечности. Тогда мы получили бы перпетуум мобиле, которое, однако, существенно отличается от упомянутого выше. Тогда как в первом случае энергия должна была рождаться из ничего, здесь этого нет. Например, когда мы производим изотермическое расширение газа, согласно сказанному выше, из окружающей среды в цилиндр поступает столько теплоты,

сколько соответствует произведенной механической работе. Но по нашему предположению молекулы возвращаются в первоначальное пространство сами собою, т.-е. без затраты энергии. Итак, мы видим, что условие для сохранения одного и того же количества энергии вполне соблюдено, потому что, если пренебречь потерями, наша машина потребляет из окружающего пространства столько же тепловой энергии, сколько она совершает механической работы. Такое перпетуум мобиле, которое само по себе возможно, настолько невероятно в связи с вышеизложенным, что оно все-таки по нашим понятиям невозможно. Его называют перпетуум мобиле 2-го рода. Его можно себе представить также и в ином виде. Так как скорость движения для значительного числа молекул какого-нибудь газа превышает среднюю быстроту, было бы мыслимо выделить молекулы, летящие быстро. Тогда это отделенное количество газа имело бы более высокую температуру, и мы могли бы использовать его тепловую энергию известными нам путями. Но и такая случайность крайне невероятна.

ПОНЯТИЕ ОБ ЭНТРОПИИ.

Все воды земли бегут вниз и в конце-концов стремятся в море. Конечно, мы могли бы заставить воду где-нибудь течь и вверх, но только в том случае, если бы мы предоставили

ей вместе с тем и соответствующее падение, как в длинном колене сифона. Всякий человек и всякое животное стареют с каждым днем. Хотя многие клетки тела постоянно обновляются и делятся, тело в целом стремится к старости и к конечному распаду. Точно так же и энергия стремится к отдаленной цели, к состоянию наибольшей вероятности, и это происходит двояким путем: во-первых--посредством перехода в неправильные движения тепловой энергии, а во-вторых—посредством рассеивания в безграничном пространстве. Таким образом, можно говорить и для энергии о процессе старения и об окончательной смерти ее, когда вся энергия превратится в теплоту наивозможно низкой температуры. Итак, в данном смысле энергия постоянно стареет, вместе с тем обесцениваясь, и никогда не становится моложе. На нашей земле нет такого процесса, при котором деятельная энергия шла бы обратным путем. В частности, под влиянием человека энергия одного тела может омолодиться, т.-е. перейти в состояние меньшей вероятности, но только в том случае, если энергия другого тела, участвующего в процессе, соответственно стареет; так что состояние энергии в общем все-таки становится более вероятным.

Не можем ли мы выразить математически это старение энергии тела? Мы знаем, что энергия стареет тем сильнее, чем, во-первых,

больше энергии при данном процессе вообще переходит в форму теплоты, и, во-вторых, чем больше она рассеивается в пространстве. Или, говоря иначе: 1. энергия стареет тем сильнее, чем больше энергия q, которую тело воспринимает в форме теплоты, и 2. энергия стареет тем больше, чем ниже абсолютная температура T тела, потому что высокая температура означает накопленную тепловую энергию, и потому что последняя стремится, если пространство достаточно велико, рассеяться так, чтобы абсолютная температура достигла нуля.

Сопоставляя и то и другое, мы можем изобразить старение энергии всякого тела при каком-либо процессе в виде выражения $q : T$. Ниже мы будем называть старение энергии общепринятым термином „энтропия" и выражать ее буквою S. Итак, если энтропия какого-либо тела есть S_1, и если при абсолютной температуре T в него поступает небольшое количество теплоты q, тогда его энтропия увеличивается до величины S_2. В этом случае прирост энтропии выразится так:

$$S_2 - S_1 = \frac{q}{T} \quad \dots\dots\dots \quad (8),$$

причем количество теплоты q предполагается настолько незначительным, что оно не вызывает заметного изменения температуры T.

Изменение энтропии тела очень легко вычислить, когда при поступлении или при по-

тере теплоты температура остается постоянной, как бывает, например, при испарении воды при постоянном давлении. В таких случаях изменение энтропии просто равняется всей поступающей теплоте, деленной на постоянную, абсолютную температуру. Вычисление бывает сложнее тогда, когда температура повышается с поступлением теплоты, как бывает при всяком обычном нагревании. Например, чтобы нагреть 1 кг. воды с 50° до 80°, мы должны доставить 30 кал. Вначале абсолютная температура будет $273+50=323°$, а в конце $273+80=353°$. Мы можем представить себе, что количество теплоты в 30 кал. разбито на части, величиною в q; тогда для каждой части получается выражение $q:T$, где T есть средняя температура во время поступления q; затем мы складываем все частные. В нашем примере, если бы мы разложили 30 кал. на пять частей по $q=6$ кал., получилось бы:

$$S_2 - S_1 = \frac{6}{326} + \frac{6}{332} + \frac{6}{338} + \frac{6}{344} + \frac{6}{350} = 0{,}0888.$$

Точный расчет производится по равенству:

$$S_2 - S_1 = G.\,c.\,log.\,nat.\frac{T_2}{T_1} \quad . \ . \ . \ (9),$$

где G есть вес тела в кг., c — теплоемкость, T_1 — абсолютная начальная температура и T_2 — конечная температура.

ЭНТРОПИЯ ПРИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ.

Рассмотрим реальный процесс нагревания. Пусть мы имеем 1 кг. воды при 0° и 1 кг. при 100°. Мы соединяем их так, что температура может выравняться, и получаем тогда, как известно, 2 кг. воды при 50°. Мы знаем по опыту, что этот процесс действительно возможен, и поэтому должны заключить, что энтропия соответствующих тел должна увеличиться. Как было указано выше, мы вычисляем прибыль энтропии, которую испытывает 1 кг. воды при нагревании с 0° до 50°, и получаем 0,16088. Убыль энтропии второго килограмма воды, который охлаждается с 100° до 50°, равна 0,14393, так что в итоге при выравнивании температуры происходит прибыль энтропии в 0,16088 — 0,14393 = 0,01695.

ОБРАТИМЫЕ ПРОЦЕССЫ.

Если мы пожелаем совершить вышеописанный процесс в обратном направлении, т.-е. получить из 2-х кг. воды в 50° один кг. в 0° и один в 100°, энтропия должна будет уменьшаться на 0,01695. Но мы знаем, что это невозможно. Кроме того, отсюда вытекает, что обратимы только такие процессы, при которых энтропия всех тел, участвующих в процессе, не уменьшается и не увеличивается. Мы уже рассматривали такие обратимые процессы на рис. 1.

Как только мы прилагаем к поршню противодействующую силу, которая во всякое мгновение поддерживает давление газа в равновесии, мы можем пройти адиабату или изотерму произвольно в любом направлении. Следовательно, при этом энтропия всех тел, участвующих в процессе, должна остаться неизменной. Но, конечно, мы не можем ожидать, что процесс будет протекать сам собою, потому что при этом должна была бы возрасти энтропия; здесь по меньшей мере нужен толчок. Итак, обратимые процессы с нулевым изменением энтропии стоят на рубеже между возможными и невозможными процессами, а всякий действительно протекающий процесс требует прибыли энтропии (принцип энтропии).

Возвратимся к обратимому изотермическому процессу, изображенному на рис. 1. Пусть газ сжат в цилиндре до малого объема и расширяется, совершая работу. Так как при изотермическом расширении температура T_1 остается постоянной, теплота Q, превращающаяся в работу, должна поступать в цилиндр из окружающего пространства. При этом происходит убыль энтропии окружающего пространства, $Q : T_1$, а так как общая энтропия, вследствие обратимости процесса, остается неизменной, энтропия газа должна увеличиться также на $Q : T_1$. Ясно также, что энтропия газа должна

при этом увеличиться, потому что тепловая энергия газа, которая при расширении газа, конечно, остается постоянной, впоследствии распределяется в значительно большем пространстве, а это и составляет признак увеличения энтропии.

При адиабатическом расширении теплота не может поступать в цилиндр, потому что по нашему предположению он совсем не проводит тепла. Поэтому теплота, нужная для производства работы, должна быть заимствована из теплового запаса газа, причем он охлаждается с T_2 до T_1. Так как этот процесс обратим, и так как в нем участвует только о д н о тело, именно газ, его энтропия должна остаться неизменной. Можно представить себе, что при охлаждении происходит уменьшение энтропии, которое как-раз уравновешивается прибылью, обусловленной распределением энергии на большее пространство.

ПРЕВРАЩЕНИЕ ТЕПЛОТЫ В МЕХАНИЧЕСКУЮ РАБОТУ.

Положим, что мы имеем в своем распоряжении большое тело, в котором запас тепла настолько значителен, что температура тела T_1 не претерпевает значительного уменьшения, когда мы отнимаем некоторое количество теплоты Q_1. Предположим, что мы превращаем эту теплоту Q_1 в механическую работу, при

чем путь, которым это совершается, для нас безразличен. Возможно ли это? Когда мы отнимаем от нагретого тела несколько тепловых единиц Q_1, энтропия его понижается на $Q_1 : T_1$. Но второго тела, энтропия которого вырастала бы по крайней мере на столько же, не имеется; энергия Q_1 впоследствии уже не имеет форму теплоты. Следовательно, такой процесс невозможен, потому что для него потребовалось бы уменьшение энтропии.

Чтобы описанный процесс стал возможным, остается только ввести в него второе тело, которое нам в сущности не нужно, и позаботиться о том, чтобы его энтропия повысилась по меньшей мере настолько, насколько энтропия первого тела падает. Это может быть достигнуто двояким способом. Во-первых, мы можем получить увеличение энтропии второго тела, предоставляя ему, как газообразному телу, занять больший объем, вследствие чего его энергия распределится на большее пространство, или же, сохраняя прежний объем, мы можем доставить ему некоторое количество теплоты, вследствие чего его энтропия также возрастет.

Первый случай уже рассмотрен на рис. 1: газ расширяется изотермически и поглощает из окружающего пространства, которое в нашем случае представлено нагретым телом, столько теплоты, сколько производится механиче-

ской работы при расширении. Таким образом, теплота Q_1 превращается без остатка в механическую работу. Однако, в нашем распоряжении находится не вся работа, соответствующая площади $BAED$, потому что часть ее должна пойти на преодоление внешнего давления воздуха.

Далее, следует заметить, что при дальнейшей потребности в работе мы должны были бы подвергать расширению все новые и новые количества газа, и что в конце концов не хватило бы и газов земного пространства для производства той громадной работы, какую требует наша техника. Поэтому мы избираем второй путь и берем вспомогательное тело, которому мы доставляем некоторое количество теплоты, одновременно с превращением теплоты в работу, причем объем не вырастает. Вследствие поступления теплоты Q_2, при постоянной температуре T_2, энтропия тела увеличивается на $Q_2 : T_2$. Итак, это увеличение должно по меньшей мере равняться первоначальному уменьшению энтропии $Q_1 : T_1$ нагретого тела, потому что в противном случае производство работы было бы невозможно; следовательно:

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (10).$$

На практике это означает: **мы не можем превращать всю теплоту Q_1 в механическую работу, но должны отда-**

вать без пользы некоторую часть ее, именно Q_2, другому телу. Так как Q_2 всегда меньше Q_1, то, по уравнению 10-му, температура T_2 всегда ниже T_1. Например, если бы мы взяли от тела, нагретого до 200°, $Q_1 = 100$ кал., его энтропия понизилась бы на $100 : (273+200) = 0{,}211$. Чтобы процесс стал возможным, мы должны доставить часть этих 100 кал., равную Q_2, холодному телу, вследствие чего энтропия холодильника должна возрасти по крайней мере на $Q_2 : T_2 = 0{,}211$. Если предположить, что температура холодильника 50°, потеря теплоты составит $Q_2 = 0{,}211 \cdot (273+50) = 68$ кал. Но, если бы мы располагали холодильником с температурой тающего льда, мы должны были бы отнять только $Q_2 = 0{,}211 \cdot 273 = 57{,}5$ кал., и, наконец, если бы мы имели тело при температуре абсолютного нуля, Q_2 равнялось бы нулю, т.-е. нам вообще не пришлось бы отнимать теплоту, и мы могли бы превратить всю доставленную теплоту Q_1 в механическую работу. К сожалению, такой случай недостижим потому, что мы никогда не можем иметь тела с такой низкой температурой.

Теплота, превращенная в полезную работу, равна $Q_1 - Q_2$. Следовательно, полезное действие нашего превращения никак не больше:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}.$$

Из уравнения 10-го мы имеем:

$$Q_2 = Q_1 \cdot \frac{T_2}{T_1};$$

подставляя на место Q_2, получаем:

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad \text{. . . . . (11).}$$

Из этого равенства мы видим, что полезное действие при превращении тем больше, чем ниже температура холодильника T_2, и что при $T_2 = 0$ полезное действие равно 1. Кроме того, мы видим, что полезное действие тем больше, чем выше температура T_1 источника теплоты. Итак, теплота при высокой температуре позволяет нам извлекать более высокий процент механической работы, и по этой причине она представляет для нас больше ценности, чем тепловая энергия при низкой температуре.

КРУГОВОЙ ПРОЦЕСС КАРНО.

Для того, чтобы превратить теплоту в работу на практике, мы должны прибегнуть к расширению газа или пара, потому что мы не имеем способов получить работу без расширения. Но при этом мы не будем подвергать расширению все новые и новые количества газа, но будем чередовать расширение, в круговом процессе, последовательно с сжатием так, что мы можем в сущности работать вечно с одним и тем же количеством газа. Когда газ сопри-

касается с нагретым телом и воспринимает теплоту Q_1 при постоянной температуре T_1, он производит, расширяясь изотермически, работу 12 *ba* (рис. 4). Если мы теперь произведем сжатие от 2 к 1, то мы должны произвести ту же работу 21 *ab*, причем теплота Q_1 поступит обратно в нагретое тело. Но при таком движении взад и вперед мы не достигли бы ничего в смысле работы. Поэтому, после изотермы 1—» 2, мы производим адиабату 2—» 3, при которой газ заключен непроницаемо для теплоты и остывает до температуры T_2 холодильника. При этом он исполняет работу 23 *cb*.

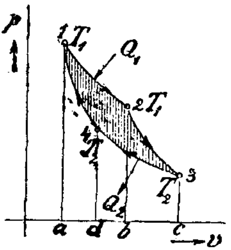


Рис. 4.

Затем газ приводят в тепловое соединение с холодильником и подвергают его изотермическому сжатию от 3—» 4, причем работа 34 *dc* потребляется и переходит в холодильник в виде теплоты Q_2. Чтобы возвратиться к исходной точке, мы производим новое адиабатическое сжатие 4—» 1, причем потребляется работа 41 *ab*. Такой процесс называется круговым процессом Карно. После того, как газ вернется к точке 1, он находится в своем первоначальном состоянии. Но, тогда как при общем расширении газ произвел работу 123 *ca*,

для сжатия понадобилась только работа 341 *ас*, так что заштрихованная поверхность 12341 представляет собою выигрыш в работе. При этом газ, во время изотермического расширения 1—» 2, воспринял теплоту Q_1 из нагретого тела, часть которой, Q_2, при сжатии 3—» 4, отдается охлаждающему телу. Итак, мы заключаем: так как газ подвергается каждый раз лишь временному расширению, и так как он постоянно возвращается к исходному состоянию, превращение теплоты в работу происходит так же, как в рассмотренном выше втором случае, при котором мы должны были доставлять холодильнику теплоту Q_2, чтобы превращение вообще стало возможным. Высказанные нами тогда соображения относительно полезного действия в одинаковой мере относятся к настоящему случаю.

ВЫРАБОТКА ЭЛЕКТРИЧЕСТВА ИЗ ТЕПЛОТЫ.

Обыкновенно превращают тепловую энергию сначала в механическую работу, а затем уже и электрическую энергию. Но существует способ получать электричество прямо из теплоты. Две проволоки из различного материала спаивают в точках *А* и *В*, рис. 5. Если мы будем нагревать место спайки *А* и охлаждать место *В*, в этом замкнутом кольце возникает электрический ток. Это превращение также

следует приведенному выше закону. Из тепла Q_1, которое поступает в место спайки A, только часть переходит в электрическую энергию. Остальное количество, Q_2, без пользы отдается холодильнику B в спайке B, потому что электрический ток всегда стремится устранить причину своего возникновения, т.-е. высокую температуру при A и низкую температуру при B.

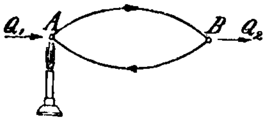


Рис. 5.

МЫШЕЧНАЯ МАШИНА.

Превращение энергии совершается также в мышце животного. Мы только не знаем, происходит ли механическая работа, выполняемая мышцей, непосредственно из ее химической энергии, или же химическая энергия сначала переходит в тепло и лишь после того—в работу, как бывает в наших тепловых двигателях. Исследования показали только, что полезное действие мышцы составляет около η=0,3 до 0,4. Если мы примем цифру 0,3, а самую низкую температуру тела возьмем в 37° Ц., то, по расчету теплового двигателя, теплота, подлежащая превращению, по уравнению 11-му должна была бы достигать высокой цифры 206° Ц. Такую цифру трудно принять, и скорее можно заключить, что химическая энергия мышцы прямо переходит в работу.

НЕ РАСТОЧАЙ ЭНЕРГИИ, ИСПОЛЬЗУЙ ЕЕ!

Это требование, заявленное В. Оствальдом, уже хорошо знакомо современному технику, но им должен был бы руководствоваться каждый и во всякое время. Как в технике издавна стремятся строить машины с наибольшим полезным действием; как стараются извлечь пользу из отработавшей теплоты, которая раньше ускользала без пользы; как мы выучились, наконец, сводить всякий процесс при работе и всякий прием к безусловно необходимому, наименьшему расходу энергии, так и в повседневной жизни нам следовало бы более следить за целесообразностью всех наших действий. Конечно, и наилучший строитель не может создать такой машины, которая превращала бы без остатка поступающую в нее энергию. Но при искусном устройстве и тщательном выполнении все-таки возможно достигнуть такого полезного действия, которое будет недалеко от идеала—единицы. Существуют большие электрические машины, полезное действие которых $\eta = 0{,}96$, т.-е. только 4% поступающей энергии без пользы переходит в теплоту.

Но одним высоким процентом полезного действия еще не выполняется требование, поставленное нами в заголовке. Мы знаем, что одинаковые количества энергии далеко не равноценны между собою; что существуют высоко-

ценная энергия и менее ценная теплота, и что ценность энергии будет тем меньше, чем сильнее рассеивается энергия, чем более возрастает энтропия. Поэтому мы не только не должны расточать энергию без пользы, но не должны также без надобности превращать ценную энергию в малоценную теплоту. Нам известно, что в мире не существует такого процесса, при котором не возрастала бы энтропия. А так как рассеивающаяся тепловая энергия утрачивает для нас цену, мы требуем, чтобы все процессы были рассчитаны на возможно меньшее возрастание энтропии. Обратимые процессы удовлетворяют этому требованию вполне, ибо при них энтропия не возрастает, потому что наступающее увеличение энтропии уничтожается равновеликим уменьшением ее. Но, к сожалению, обратимые процессы представляют собою только мыслимые, идеальные явления, к которым мы можем в действительности приблизиться, но не можем достигнуть их.

ПОЛЕЗНОЕ ДЕЙСТВИЕ 2-го РОДА.

Когда в вышеприведенном примере мы произвели обмен теплоты между двумя объемами воды, с одной стороны произошло уменьшение энтропии, а с другой — более значительное увеличение ее. Мы можем это наблюдать при всяком процессе. Если мы назовем отношение

уменьшения энтропии к увеличению ее полезным действием второго рода, или энтропическим полезным действием, мы должны будем стремиться, чтобы уменьшение и увеличение уравновешивались, т.-е., чтобы не только обычное полезное действие, но чтобы и энтропическое полезное действие по возможности приближались к единице.

Круговой процесс Карно состоит из четырех отдельных стадий изотермического или адиабатического характера. Как при изотерме, так и при адиабате, согласно сказанному выше, уменьшение энтропии равняется происходящему одновременно увеличению ее, так что при завершении этого обратимого кругового процесса энтропическое полезное действие должно равняться единице. Наши действительно существующие тепловые двигатели никогда не достигают этой предельной величины.

ПРЕВРАЩЕНИЕ БОЛЕЕ ВЫСОКОЙ ЦЕННОЙ ЭНЕРГИИ В ТЕПЛОТУ.

Как известно, нетрудно превращать механическую работу или же электрическую энергию без остатка в теплоту, потому что при этом, вследствие развития теплоты, происходит значительное увеличение энтропии без ее уменьшения. Следовательно, полезное действие 2-го рода равно нулю. Из этого мы заключаем, что, вследствие таких условий для полезного дей-

ствия 2-го рода, крайне нежелательно вырабатывать малоценную теплоту из ценной энергии, какую представляет собою механическая работа или электричество; мы задаемся вопросом, нет ли способа повысить энтропическое полезное действие. Предположим, что мы должны развить теплоту Q_1 при постоянной температуре T_1. Происходящее при этом увеличение энтропии составляет $Q_1 : T_1$. Но мы знаем, что нет надобности в таком значительном увеличении энтропии; что достаточно даже бесконечно малого увеличения ее, чтобы процесс стал возможным. Поэтому мы можем связать процесс развития теплоты со вторым процессом, при котором будет происходить уменьшение энтропии. Конечно, это уменьшение никак не может превышать $Q_1 : T_1$; его можно было бы достигнуть, например, путем н а к о п л е н и я энергии хотя бы посредством сжатия газа. Изотермическое сжатие по рис. 1 требует работы *ABDE*, причем теплота Q_1 при постоянной температуре T_1 выходит наружу. Но как только мы разовьем, путем сжатия газа, нужную теплоту Q_1 из механической работы, значительное увеличение энтропии покроется столь же значительным уменьшением ее, и полезное действие второго рода достигнет единицы.

Но есть и второй способ рационально превращать механическую работу в соответствующее количество тепла Q. Когда это тепло долж-

но быть сообщено первому телу, наступает увеличение энтропии $Q : T_1$. Но мы можем и в этом случае прибегнуть ко второму, параллельному процессу, который будет протекать с уменьшением энтропии; например, мы будем отнимать от второго тела, с температурой T_2, теплоту Q_2, и будем сообщать ее также первому телу. Чтобы этот процесс был возможен, уменьшение энтропии второго тела должно отнюдь не превышать общего увеличения энтропии первого тела от Q и Q_2, то-есть:

$$\frac{Q+Q_2}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2} \quad \ldots\ldots \quad (12).$$

Так как числитель на левой стороне больше, чем на правой, T_1 должно быть больше, чем T_2. Таким образом, при получении теплоты Q из ценной энергии возможно вместе с тем отнимать еще теплоту Q_2 от тела с низкой температурой и совместно с Q сообщать ее более теплому телу.

Также и в этом случае сказанное выше выполняется проще всего по круговому процессу Карно. Мы должны лишь провести его (рис. 4) в обратном направлении. Механическая работа, затраченная в круговом процессе и переведенная в теплоту, представлена площадью 32143. При расширении 4 —» 3, от холодильника отнимается теплота Q_2, тогда как при сжатии 2 —› 1 более теплому нагретому телу сообщается бо́льшая теплота $Q_1 = Q + Q_2$. Таким

образом, мы имеем возможность всегда вновь охлаждать холодильник и, наконец, довести воду до замерзания, когда этим телом бывает вода в льдоделательной машине. Мы можем также использовать этот прием, чтобы отнять от окружающего пространства теплоту Q_2, которую мы сообщаем телу для нагревания его, совместно с теплотой Q, полученной из работы. Жертвуя небольшим количеством ценной энергии, этим путем можно извлечь из окружающего пространства довольно значительное количество тепла, температуру которого можно еще повысить. Поэтому мы можем говорить о «тепловом насосе».

Нагревание холодного тела более теплым всегда является процессом необратимым и сопряжено со значительным увеличением энтропии. Этот процесс был бы обратим только в том случае, если бы температура тела, отдающего теплоту, равнялась температуре тела, воспринимающего ее: но в таком случае тепловой ток вовсе не установился бы. Итак, необходимость заставляет нас прибегать к нагретому телу с несколько более высокой температурой, с чем неизбежно связано некоторое увеличение энтропии. Но чем больше разница температуры, тем сильнее возрастает энтропия при обмене тепловой энергии, и, следовательно, тем менее благоприятно будет энтропическое полезное действие. Поэтому не следует нагре-

вать в топке, имеющей высокую температуру, тело, значительно более холодное. Но на практике мы все-таки часто так поступаем, и в этих случаях играет роль время, нужное для обмена тепловой энергии. Это время тем больше, чем меньше разница температуры. Мы могли бы повысить энтропическое полезное действие при процессе нагревания, если бы на ряду с нагреванием, увеличивающим энтропию, мы установили второй процесс, связанный с уменьшением ее: например, добывание механической или электрической энергии из теплоты. Если мы имеем топку, температура которой равна 900° Ц., и желаем посредством нее испарять воду при нормальном давлении, этот процесс был бы нерационален даже и в том случае, если бы нам удалось вполне устранить трату тепловой энергии. Например, если мы доставляем воде, с температурой в 100°, 1000 кал., ее энтропия возрастает на 1000:373°=2,68. Но энтропия топки падает при этом только на 1000 : 1173° = 0,85, так что при нашем процессе энтропия возрастает на 2,68 — 0,85 = 1,83. Так как это возрастание энтропии нежелательно, то мы можем взять от топки еще некоторое количество тепла Q, которое мы можем превратить без остатка в ценную энергию, если мы примем меры, чтобы происходящее при этом уменьшение энтропии Q : 1173 не превысило 1,83. Следовательно, тепловая энергия, подлежащая

превращению, составит 1173 . 1,83 = 2147 кал. Этим путем мы избегаем обесценения энергии при нашем процессе ($\eta'' = 1$).

АДИАБАТИЧЕСКОЕ РАСШИРЕНИЕ ПРИ ПОСТОЯННОЙ ЭНЕРГИИ.

Газ, заключенный в пространстве *A* (рис. 3), расширяется, если перегородка удалена, и проникает в пространство *B*, которое также непроницаемо для теплоты. По окончании этого процесса температура газа должна равняться первоначальной, потому что не было ни взято, ни доставлено энергии. Можно себе представить, что изменение состояния распадается на три отдельные стадии: 1) энергия пространства *A* распространяется на все пространство $A+B$, вследствие чего энтропия увеличивается; 2) при этом адиабатическом расширении температура понижается, в результате чего энергия уменьшается настолько же, насколько она увеличилась в стадии 1-й; 3) энергия движения газа, притекающего в *B*, превращается в теплоту, вследствие чего восстанавливается прежняя температура, и энтропия возрастает. Итак, процесс в общем влечет за собою увеличение энтропии и, следовательно, необратим. Мы могли бы избежать увеличения энтропии, если бы как-нибудь изъяли энергию движения вытекающего газа, причем мы извлекли бы и механическую энергию из теплоты.

ПОЛУЧЕНИЕ ЭНЕРГИИ ДВИЖЕНИЯ ИЗ ТЕПЛОТЫ.

В предшествующем примере струя газа по направлению к пространству *B* образовалась вследствие того, что молекулы, движущиеся в сторону перегородки, после ее устранения получили возможность беспрепятственно двигаться дальше. Следовательно, струя газа есть не что иное, как летящие молекулы газа. Но, по причине первоначальной беспорядочности в движении молекул, бесчисленное множество молекул будет двигаться поперек направления струи, так что мы можем считать измеримую скорость газовой струи за среднюю скорость всех молекул в направлении струи. Эта средняя скорость, которая, между прочим, совпадает со скоростью распространения звука в газах, конечно, меньше, чем упомянутая нами выше скорость движения молекул, и составляет около $^2/_3$ ее.

Если бы нам удалось вполне упорядочить движение молекул, так, чтобы все они двигались в одном и том же параллельном направлении, тогда мы превратили бы тепловую энергию целиком в энергию движения. В таком случае температура струи газа должна была бы равняться нулю, потому что беспорядочное движение, которое составляет признак тепловой энергии, было бы устранено. Кроме того,

газовая струя уже не оказывала бы давления перпендикулярно к направлению движения, потому что молекулы, движущиеся параллельно, могут сообщать лишь толчки в направлении движения.

Для выпрямления движения молекул в технике пользуются насадком. Он изображен на рис. 6. Пусть в пространстве *А* находится пар под высоким давлением, тогда как в *В* давление равно нулю. В своем беспорядочном полете молекулы пара в *А* попадают и в отверстие насадка, и, так как

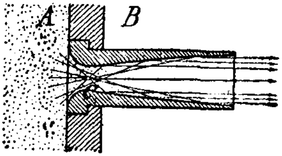


Рис. 6.

они там не сталкиваются с другими молекулами, они беспрепятственно летят дальше, образуя струю пара, которая, как указано выше, проходит самое узкое место *С* с наибольшей возможной скоростью, со скоростью распространения звука. Но техника не довольствуется таким частичным выпрямлением молекул: после *С* насадок расширяется и напоминает удлиненное вогнутое зеркало, фокус которого лежит приблизительно в *С*. Поэтому молекулы, еще не направившиеся по параллельным путям, наталкиваясь на стенки, отражаются в направлении движения струн. Следовательно, выпрямление становится все полнее, по мере удаления

от *C*. Но чем более выпрямлены молекулы, тем больше должна быть средняя скорость их движения в направлении струи, и тем значительнее должна падать температура и ослабевать давление на стенки насадка. Наибольшая скорость, которой может достигнуть струя пара при полном выпрямлении, есть именно та скорость, о которой мы говорили выше, и которая присуща беспорядочному движению отдельных молекул.

На практике пространство *B* не бывает пустым, но его наполняют паром при низком давлении; при этом стремятся выравнять движение молекул настолько, чтобы давление струи пара понизилось до давления в пространстве *B*. Скорость движения струи пара очень легко вычислить, потому что энергия движения при выходе неизбежно должна соответствовать уменьшению тепловой энергии. Например, если в пространстве *A* находится перегретый пар под давлением в 10 атмосфер и при 300°, который расширяется в насадке адиабатически до 2 атм. и 120° Ц., тогда количество тепла в одном кг. первого пара составляет 728 кал., и второго — только 645 кал. Итак, при проходе одного кг. пара 728 — 645=83 кал. превратилось в энергию движения, то-есть (по ур. 4) 83.426=35.300 кгм. Такова должна быть величина энергии движения, выраженной 2-м равенством, то-есть:

$$\frac{m.\,v^2}{2} = \frac{G.\ v^2}{g.\,2.} = 35300 \text{ кгм.}$$

Здесь, по нашему предположению, $G=1$ кг., а $g=9{,}81$.

Следовательно, скорость движения пара составляет:

$$v = \sqrt{\frac{35300 \,.\, 2 \,.\, 9{,}81}{1}} = 832 \text{ м. в сек.}$$

ДЕЙСТВИЕ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ.

Остается сообщить энергию движения струи пара колесу. В паровых турбинах это устроено так: струя пара, которая приобрела при выходе из насадка или направляющего шкива скорость c_1, по рис. 7 отклоняется от своего направления посредством лопастей турбинного колеса. Вследствие этого отклонения струя пара приводит колесо во вращательное движение. Так как колесо совершает оборот со скоростью u, струя пара, если смотреть на нее со стороны колеса, движется с кажущейся меньшей скоростью W_1, с которой пар также продолжает двигаться между лопастями. Было бы выгод-

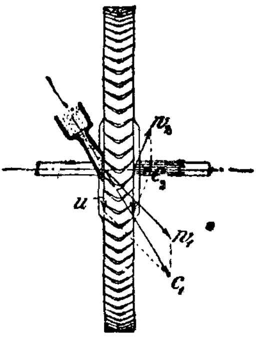


Рис. 7.

нее всего, если бы струя пара отдавала всю свою энергию движения колесу, т.-е. если бы действительная скорость ее при выходе равнялась нулю. На практике этого, к сожалению, не бывает, потому что пар должен еще обладать достаточной скоростью, чтобы самостоятельно выходить. Если мы смотрим от колеса, при чем кажущаяся скорость его при выходе пусть будет W_2, тогда действительная скорость его при выходе, вследствие вращения колеса, будет только c_2.

ЭНТРОПИЯ ПАРА.

Увеличение энтропии при выработке пара вычисляется в точности по вышеприведенному расчету. Если мы будем исходить от 1 кг. воды при 0° Ц. и предположим, например, постоянное внешнее давление в 1 атм., испарение начинается только при 100° Ц. До этого момента мы должны сообщить килограмму воды 100 кал., и энтропия его составит 0,31. Чтобы испарить это количество воды, т.-е. превратить воду при 100° в насыщенные пары, также при 100°, мы должны, как известно, сообщить 539 кал. А так как абсолютная температура остается при этом постоянной, $273+100=373°$, энтропия, от начала испарения до конца его, увеличивается на $539:373=1,445$ и составит $0,31+1,445=1,755$. Если сообщить пару, при постоянном давлении в 1 атм., еще более тепло-

ты, он перегревается, при чем его температура и объем возрастают. Теплота, нужная для нагревания 1 кг. на 1°—теплоемкость пара ср— равна 0,48. Итак, чтобы перегреть пар с 100° до 110°, нужно 0,48.10=4,8 кал. Так как средняя температура во время этого процесса составляет 105+273=378°, энтропия увеличивается на 4,8 : 378=0,0127 и составляет 0,31+ +1,445+0,0127=1,7677. Теплота, содержащаяся в килограмме пара при 100°, составляет 100+539+4,8=643,8 кал. Если предоставить пару охладиться при постоянном давлении, энтропия также понизится. При 100° пар переходит из перегретого состояния в насыщенное. Но, при дальнейшем отнятии теплоты, температура перестает падать, и часть пара переходит в воду, которая смешивается с паром, большею частью в виде тонкого тумана, и бывает причиною образования так называемого м о к р о г о п а р а. Если охлаждение настолько значительно, что вес сухого пара составляет x=0,9, т.-е. 0,1=10% насыщенного пара перешло в воду, тогда от теплоты испарения остается в наличности только 0,9.539=485 кал., тогда как теплота жидкости, которая потребовалась для нагревания 1 кгр. воды от 0° до температуры испарения 100°, сохранилась еще целиком в виде 100 кал. Итак, количество тепла этого влажного пара составляет 485+100=585 кал. Следовательно, количество взятого тепла будет 639—

—585=54 кал., при чем энтропия понижается на 54 : 373 = 0,145. Следовательно, энтропия влажного пара еще равна 1,775—0,145=1,61.

ДИАГРАММА ЭНТРОПИИ.

Инженер применяет также и к своей умственной работе правило: «не расточай энергию без пользы». Так как ему часто бывает нужно знать энтропию и количество тепла водяного пара при различном давлении, он вычисляет эти цифры так, как мы сделали выше для 1 кг. пара при 1 атм., раз навсегда для всякого давления, и заносит результаты графически по системе координат, как на рис. 8. Мы узнаем в этой диаграмме результаты наших вычислений. В начале испарения, при 1 атмосфере (точка *a*), количество тепла составляет 100 кал., при энтропии 0,31. По окончании испарения (точка *b*) количество тепла повышается до 639 кал., а энтропия—до 1,755. *b — c* соответствует перегреванию (на рис. 8 с правой стороны изображена часть левого чертежа в увеличенном виде). Линия *e—f* есть граница между перегретыми и насыщенными (а также мокрыми) парами. Далее, в области перегревания все точки с равной температурой соединены между собою линиями, а также в области мокрого пара все точки одинаковой влажности.

ПОЛЬЗОВАНИЕ ДИАГРАММОЙ ЭНТРОПИИ.

Оно крайне просто, если мы вспомним, что при изотермическом изменении состояния температура не меняется, тогда как при адиабатическом изменении состояния энтропия остается постоянной. Если в паровой машине пар расширяется адиабатически с 15 атм. 350° до 1 атм., этот процесс должен выразиться на диаграмме в виде вертикальной прямой *g*—*h*, потому что только для этой прямой энтропия остается постоянной = 1,7. Мы видим, что конечное состояние *h* приходится в области мокрого пара, и что тогда вес сухого пара составляет $x=0{,}96$.

Если пар расширяется изотермически с 2 атм. при $x=0{,}9$ до 0,5 атм., получается линия постоянной температуры *i*—*k*—*l*.

Чтобы вычислить скорость, которую приобретает струя пара в насадке турбины, нужно только взять из диаграммы падение температуры и тем же приемом перечислить его на энергию движения. Если, например, пар расширяется в насадке с 15 атм. 350° до 1 атм., линия *g*—*h* представляет падение температуры 752—618 = 134 кал. = 134.426 = 57000 кгм. Этой энергии движения соответствует скорость пара 1060 м./сек. Мы не получили бы такой большой скорости, если бы насадок имел простое отверстие, без выпрямляющего расширения. В

этом случае наивысшая скорость равнялась бы нулю, если бы в пространстве A, как и в B, находился насыщенный пар при давлении в

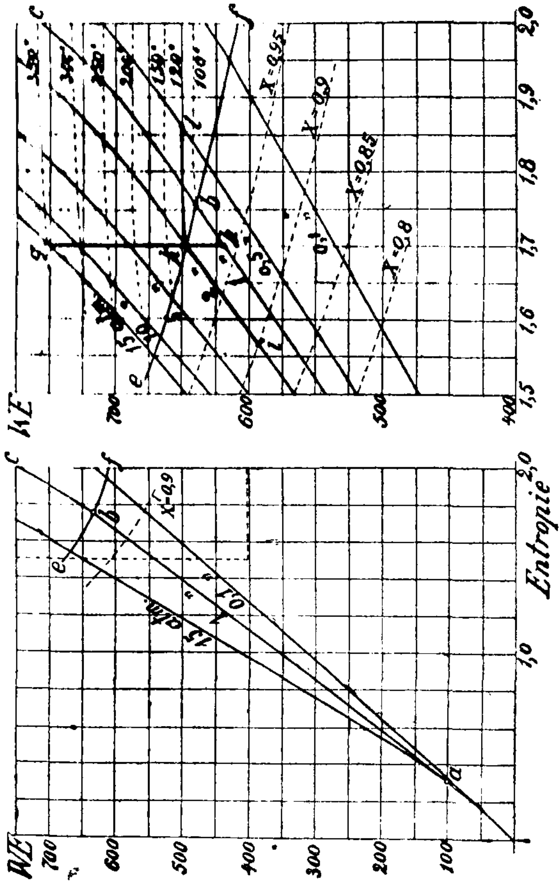


Рис. 8.

1 атм., потому что через отверстие из *А* в *В* пролетело бы столько же молекул, сколько пролетело из *В* в *А*. Но повышение давления в *А* до 1,2 атм. уже вызвало бы, по рис. 8, падение тепла на 7,5 кал., и вместе с тем пар приобрел бы скорость в 250 м./сек. При давлении в 1,5 атм. в *А*, скорость пара достигла бы 382 м/сек., а приблизительно при 1,75 атм. получилась бы наивысшая скорость, около 430 м/сек., соответствующая скорости распространения звука. Итак, при подобном насадке не имело бы смысла повышать давление в пространстве *А*, и при значительной разнице в давлении понадобилось бы разложить его на целый ряд последовательных ступеней.

Пользование диаграммой энтропии для определения работы и расхода пара в турбине также крайне просто. Например, если в нее поступает пар при 15 атм. 350°, который в конце расширяется адиабатически при давлении конденсатора в 0,1 атм., рис. 8 показывает нам полезное падение теплоты, в 752—538=214 кал., на килограмм пара. Следовательно, для 860 кал., которые по рав. 5-му соответствуют килоуатт-часу, понадобилось бы 860 : 214=кг. пара, так что турбина, при выработке 1000 килоуаттов, должна была бы потреблять в час 4.1000=4000 кг. пара. Конечно, мы здесь не принимаем во внимание неизбежные потери. Если мы будем работать не с

перегретым, а с насыщенным паром при 15 атм., падение теплоты составит только 670—490=180 кал., и для работы в 1000 килоуаттов понадобится 4788 кгр. пара в час.

КРУГОВОРОТ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ.

Когда пар., расширяясь, прошел через турбину, он поступает в конденсатор, где сгущается в воду, от охлаждения извне. Образовавшаяся в конденсаторе вода вновь направляется в паровой котел для питания его, и таким образом вода совершает круговорот, служа только посредницей между топкой котла и турбиной для передачи энергии. Так же, как и в процессе Карно, мы можем различать здесь четыре отдельных явления: 1) доставление теплоты Q_1, которое в этом случае происходит в котле и в соединенном с ним перегревателе; 2) адиабатическое расширение в турбине; 3) отдача теплоты Q_2 в конденсаторе и 4) обратный отток воды из конденсатора в паровой котел. Для питания котла нужно лишь ничтожное количество энергии, потому что объем воды весьма мал, сравнительно с объемом пара, и могло бы казаться, что в этом заключается значительное преимущество перед процессом Карно, при котором газ переводится обратно при адиабатическом сжатии лишь на счет большой затраты энергии. Однако, это неверно, потому

что пар теряет без пользы в конденсаторе весьма значительную теплоту испарения.

Отношение полезной энергии к затраченной составляет термическое полезное действие. Согласно вышеприведенным цифрам, 214 кал. превращаются в механическую работу, тогда как при температуре 45° Ц., соответствующей давлению в конденсаторе 0,1 атм., для образования пара нужно доставить 752—45=707 кал. Следовательно, полезное действие 214 : 707=0,303. При круговом процессе Карно для тех же температур 350° и 45°, по рав. 11-му, полезное действие составило бы

$$1 - \frac{273 + 45}{273 + 350} = 0,49.$$

СОДЕРЖАНИЕ.